

6. 사면에서의 암반공학 응용 I

6.1. 서언

대규모 암반사면에서의 굴착은 도로, 댐, 수력발전소 및 원자력발전소 등의 건설현장이나 광산에서 잘 볼 수 있다. 자연암반은 여러 가지 지질학적 불연속면(절리, 층리, 단층등)을 포함하고 있다. 이들 불연속면은 암반의 역학적 특성을 나타내는 하나의 중요한 요인이 된다. 따라서 암반사면의 안정성을 고려할 경우 암반의 불연속성을 특히 고려할 필요가 있다.

암반의 역학적 특성은 암석과 불연속면의 역학적 특성 및 불연속면의 공간적인 기하학적 특성 등 세가지의 요인을 반영하고 있다. 이들 세 요인중 암석과 불연속면의 역학적 특성에 대하여는 이론적 및 실험적인 평가가 가능하다고 하겠다. 또한 이들에 관한 연구성 과도 많다. 그러나 불연속면의 기하학적 특성에 대하여는 몇가지의 정량화 방법이 제안되어 있지만 암반의 역학적 특성과 관련해서 얻어지는 정량화에 대하여는 최근에 들어와서 활발히 연구되고 있는 실정이다.

암반불연속면의 역학적 특성은 균열의 개구도, 균열벽면에서의 요철, 암석자체의 압축강도 및 불연속면에서의 전단강도 등으로 구분된다. 이와같은 불연속면을 포함한 암반의 역학적 특성은 그 불연속면의 규모, 밀도 및 분포상태에 의해 등방성, 이방성 및 비

* 정희원, 안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과 조교수

균질성 등으로 모델화 되어지지만 고려해야 할 암반 영역의 크기에 대응하는 불연속성의 영향에 차이가 있는 것은 분명한 사실이다. 또한 암반사면에서의 붕괴는 암반내에서의 응력상태 변화에 기인하는 것 보다 잘 발달하고 있는 불연속면에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 도로건설에 수반하는 암반사면의 굴착과 붕괴사례를 나타내면 그림 6.1.1과 같다.



그림 6.1.1. 안동시내 아파트 주변 도로절개사면에서의 붕괴

불연속성 암반사면을 크게 구분하면 평면파괴(plane failure), 쐐기파괴(wedge failure) 및 전도파괴(toppling failure) 등의 파괴양식이 있다. 이들은 단독으로 발생하는 경우도 있지만 복합해서 일어나는 경우도 많이 볼 수 있다. 이와같은 파괴양식의 판단에는 현장의 지질구조 및 지표지질조사가 중요하다.

댐건설 현장 및 원자력발전소 등의 대규모 공사현장에서는 지질공학적 조사 및 시험 등이 상세히 실시되지만 그외 암반사면의 공사에서는 간단한 조사 및 시험만이 실시되는 정도이다. 도로사면에 눈을 돌려 보면, 고속도로, 국도 및 지방도로 변에서의 암반사면 및 침식이 현저한 해안선 부근에서의 자연사면은 안정성이 충분히 확보되지 못한 경우도 많아 실제 자주 중대한 붕괴사고를 일으키는 경우가 많다.

앞에서도 언급한 바와 같이 불연속성 암반사면에서는 여러 가지 파괴양식이 있어 실제 현장에서 어떤 파괴양식의 가능성이 있는가를 판단하기 위해서는 지금까지의 지질조사 방법으로는 불충분할 것으로 생각된다. 또한 공사의 진행과 함께 변화하는 사면형상과 변형상황으로부터 안정성을 평가하는 것은 매우 중요하기는 하지만 지질학의 충분한 조사 없이 공사경험이 적은 기술자에게는 매우 곤란해질 수도 있다.

토목기술자들은 암반역학, 암반공학에 있어서 지질학적 평가의 중요성을 충분히 이해하지 못하는 경우가 많다. 이것은 토목기술자만의 책임이 아니라 지질기술자의 조사/시험 및 설계에 대한 목적의식이 불충분한 점도 있다. 토목기술자와 지질기술자 사이에 현장에 대한 생각과 대처하는 방법에 차이가 존재하는 것은 많이 알려져 있는 사실이다.

이와같은 상황에서 지금까지는 암반사면에서 지질구조특성에 대한 정보를 충분히 살려둔 채 암반구조물, 특히 암반사면에 대한 안정성문제가 제기되어 왔다. 따라서 지질구조특성 및 그곳에 맞는 암반구조물에 관한 정보를 이용하여 마이크로컴퓨터에 의해 합리적이고도 효과적으로 활용할 수 있는 평가시스템을 구축할 필요성이 있다.

6.2. 불연속성암반의 평가법

6.2.1. 불연속면이란 ?

암반에는 절리, 층리 및 단층 등이 존재하는데 이들을 총칭해서 불연속면(discontinuity)이라고 1978년 ISRM(International Society for Rock Mechanics)에서 제안하였다. 암반에서의 역학적 특성은 그림 6.2.1에서 보여주는바 같이 불연속면의 상태에 크게 좌우된다. 이 그림은 사면에 있어서 굴착설계 및 안정성 해석에 있어서 고려되어야만 하는 암반의 공학적 성질이 시험용 암반 규모에 따라 다르다는 것, 즉 암반불연속면의 역학적 성질뿐만 아니라 구조물에 대한 불연속면의 상대적인 규모와 형태에 따라 암반의 비균질성의 평가를 변화시키지 않으면 안되는 개념적인 설명을 하고 있다. 밀도와 분포상태는 불연속면 자체의 역학적 특성에 관계가 깊기 때문에 불연속면의 특성에 대하여는 지금까지 많은 제안이 있었다.

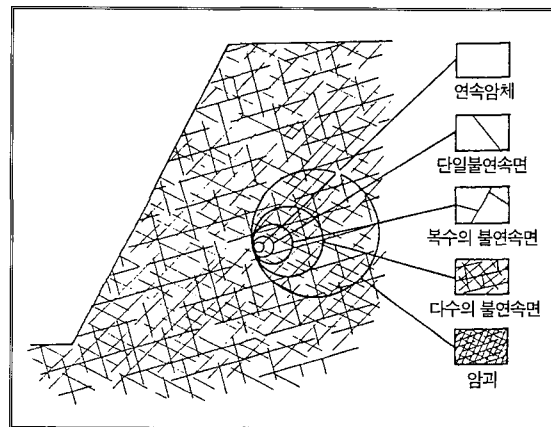


그림 6.2.1. 불연속성 암반사면에서의 scale 효과

암반의 평가는 암석시험과 지질조사의 결과에 더하여 종래의 경험에 기초로 한 여러 가지 요인을 가미하여 실시되어 왔지만, 암반구조물의 응력·변형 해석과 안정성해석을 하기 위해서는 평가된 암반을 계산에 넣기 위한 모델화가 필요하다. 그림 6.2.2에 나타낸 바와 같이 암석시험의 결과와 암반 불연속성

의 규모 및 역학특성으로부터 암반특성이 평가되기도 하고 종래의 경험에 기초를 둔 암반분류 및 불연속면의 특성을 나타내는 암반분류, 나아가 원위치 암반시험의 결과로부터 평가되기도 한다.

그림 6.2.2에서 보여주는 바와 같이 모델화로서 크게 두가지의 흐름을 생각할 수 있다. 첫째는 암반내 불연속성을 평가해서 (경험적, 실험적 혹은 이론적), 그것과 등가한 의사연속체로 생각하는 경우로서 암반의 거동은 연속체역학상에서 그 특성 (탄성, 소성, 점성; 등방성, 이방성; 균질성, 비균질성; 선형성, 비선형성등)을 나타낼 수 있다. 그외는 불연속면에 주목하여 일어나는 역학적 혹은 수리학적 특성을 고려해서 암반의 안정성을 생각하는 경우가 있다.

6.2.2. 불연속면의 특성을 고려한 암반분류

암반분류에는 암반을 구성하는 암석자체의 역학적 특성, 풍화, 변질의 정도, 불연속면의 밀도 및 성상 등의 요인이 이용된다. 불연속면의 밀도에 대하여는 암석과 암반의 탄성과 속도의 비로 표현되는 경우가 많다. 그러나 최근에는 지질학적인 요인을 고려하여 암반등급과 암반물성과의 상관성을 나타내는 방법과 간단한 계측에 의한 탄성파속도 및 일축압축강도 등의 물성치를 이용하여 암반등급을 결정하는 방법이 있다.

또한 상기의 요인에 불연속면의 특성을 넣은 평가법으로서 Q값, RMR값 및 SMR값에 의한 분류가 있지만 이 평가법을 이용하면 계측해야할 항목이 증가 할 뿐만아니라 보다 정밀한 계측도 필요하게 된

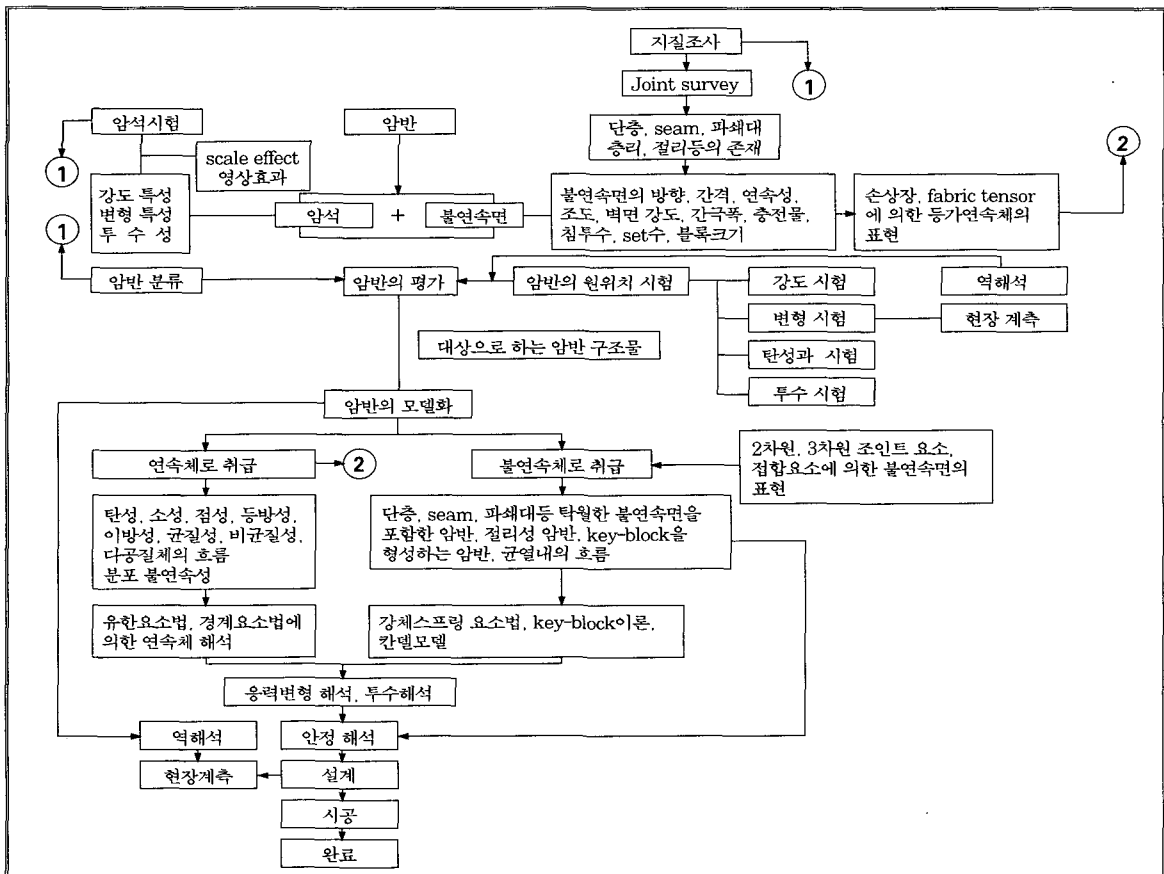


그림 6.2.2. 암반의 평가 흐름도

다. 따라서 간편성과 시험·계측에 있어서의 정밀도와의 사이에 설계·시공에 관련해서 경제적으로 어느정도까지 암반분류를 생각해야만 되는지가 문제로 된다. 암반분류에는 크게 분류해서 2종류의 방법이 있다. 그중 하나는 관측과 계측에 의해 얻은 몇 개의 요인을 종합 평가하여 등급을 분류하기 때문에 지금까지의 암반분류는 이 방법에 의하였다. 두 번째의 분류방법은 지수화한 여러 가지의 분류요인을 평가 점수로서 나타내는 것으로서 최근에 이용되는 Q값(Barton), RMR값(Bieniawski) 및 SMR값 등의 분류가 이 방법이다. 이 분류법에는 불연속면의 양적 및 질적면이 고려되어 있다.

6.2.3. 불연속성암반에 대한 실험적 연구

실내에 있어서 실험적 연구로서는 불연속면 그 자체의 역학적 특성에 관한 것과 탁월한 불연속면을 단순화한 암반모형 및 성층암괴 등을 이용한 구조체의 역학적 특성에 대한 것이 있다. 또한 원위치 암반시험에 의해 불연속성의 영향에 대하여 검토한 연구도 많다.

절리의 전단강도를 구하기 위한 것으로는 Barton과 Choubey(1977), Barton(1981)을 시작으로 하여 많은 실험이 수행되었다. 절리 등의 불연속면에서 수직 및 전단강성은 조인트요소를 이용한 유한요소법 해석에 필요한 역학적 특성이다. 불연속면이 점토 등의 풍화물질로 충전되어 있는 경우에는 그 물질의 강성은 불연속면의 강성을 지배하게 된다.

절리성암반을 대상으로한 모형실험은 대단히 많다. 이들 모형실험으로부터 암반의 역학적 특성은 주응력에 대한 불연속성의 방향, 불연속면의 간격, 길이, 개구도, 연속성, 절리의 수 및 구속응력의 크기 등에 의해 영향을 받는다는 것은 명확하다. 암반의 강도특성 및 변형특성은 불연속면의 존재에 의해 이방성을 나타내지만 그 정도는 매우 현저하고 또한 응력상태는 일축응력상태에 가까울수록 큰 이방적 거동을 나타낸다. 그러나 암반의 거동은 구속압이 증가함으로써 암석의 거동에 가깝게 된다.

6.2.4. 현장시험에 의한 불연속성암반의 평가

현장시험에 의해 불연속성을 포함한 암반의 강도 및 변형특성을 구하는 것은 넓게 이용되고 있다. 책 시험 및 암석전단시험은 그 대표적인 것이지만 이들 시험결과도 확실히 암반내의 불연속성의 영향을 받기 때문에 시험결과로부터 해석 및 설계에 이용하는 암반물성치를 평가하는데에는 암반역학 혹은 공학적 판단이 필요하다.

암반 및 암반내 구조물의 안정성에 영향을 크게 미치는 것으로서 단층파쇄대 및 seam 등은 비교적 독립된 불연속성을 고려하지 않으면 안된다. 단층파쇄대의 폭은 수 mm로부터 수 100m에 달하는 것도 있다. 암반의 안정해석에는 단층파쇄대의 성인, 분포, 폭, 연속성을 조사하여 파쇄대내 재료의 역학적 특성을 충분히 고려해서 지반모형을 작성하지 않으면 안된다.

암반내의 불연속면은 자연적 구속상태에서는 영향이 작지만 사면 등의 굴착에 의해 자유면이 형성되어 구속상태가 감소하면 그 영향은 크게 나타난다. 암반 사면의 굴착시에는 지표변위, 암반내 변위 등을 계측하여, 그 결과로부터 암반내 탁월한 불연속면의 존재를 알 수 있다.

6.2.5. 불연속면을 포함하는 암반의 모델과 해석 방법

암반사면에 있어서 암반과 불연속면의 관계는 그림 6.2.1에서 보여주는 바와 같이 암반사면의 규모가 일정하여도 대상으로 되는 현장의 범위가 다르면 영역에 들어가는 불연속면의 수가 다르며, 그 역학적 특성도 변화한다. 암반과 불연속면의 관계에 있어서 어떤 경우에는 암반을 구성하는 암석 및 불연속면의 역학적 특성이 암반의 역학적 거동을 지배하는 중요한 요인이 되기도 한다.

불연속면을 많이 포함하는 암반사면의 모델에는 적용할만한 수치해석방법과 요구되는 계산정도에 관련되지만, 기본적으로는 대상이 되는 규모에 의해 불연속면을 포함하는 암반을 등가연속체로서 취급하던가 불연속면 그 자체를 모델화에 도입한 불연속

체로서 취급한다. 각종 해석 방법을 분류하면 다음과 같다.

- 1) 분포 불연속면을 평가할 연속체모델
 - 손상역학 모델
 - 크랙텐서 모델
- 2) 개별 불연속면 모델
 - 유한요소 조인트 모델
 - 개별강체요소 모델
 - 강체 용수철 모델
- 3) 극한 평형 모델
 - 키 블록

6.3. 암반사면의 불안정 현상을 일으키는 메카니즘

암반사면의 불안정화의 요인은 인위적인 형상변화 외에 지중, 수압, 지진 및 침식에 의한 영향이 있다.

6.3.1. 지중에 의한 불안정 현상

자연사면에서는 풍화 및 침식에 의한 강도감소, 지진, 집중호우시의 표면유실 및 간극수압의 급격한 변화 등의 작용에 의한 지반내 응력이 변화하고, 불안정화가 발생한다.

자연사면 주변의 암반의 형상은 사면형상의 과정에 있어서 지질학적인 이력에 크게 영향을 받는다. 침식 초기 단계에서의 암반에서는 어느 정도의 유효점착력을 가져 그 결과로서 급경사의 사면을 형성하게 된다. 침식계곡의 높이가 증가하면 사면에 접하는 암반중에 전단응력이 증가하고, 또한 절리의 개구에 의한 응력집중 때문에 절리 주변에서는 국소적으로 파괴가 일어난다. 결과적으로는 새로운 절리를 국소적으로 발생시키게 된다. 따라서 사면의 표면에 접한 암반은 점착력이 없는 불규칙한 형상의 블록 집합체로 변화되어 불안정하게 된다.

사면의 경사각은 풍화 및 암반표면의 크리프 진전에 의해서도 서서히 감소한다. 이들 현상의 진전과정은 주로 기상조건에 크게 의존된다. 또한 서리 및 동결에 의해 활동의 원인이 되는 국소적인 절리계를 서서히 발생시켜 사면을 보다 불안정하게 만든다. 이외 인위적인 굴착에 의해 만들어진 암반사면에 대하여도 근본적으로는 동일한 메카니즘으로 설명된다.

6.3.2. 수압작용에 의한 불안정 현상

암반사면의 안정성을 충분히 확보하기 위해서는 암반자체의 역학적 특성을 명확히 하지 않으면 안된다는 것은 당연하지만 암반에서 물의 침투수압에 의한 유효응력의 감소에 대해서도 정확히 파악할 필요가 있다. 암반의 안정성에 영향을 미치는 절리 간극에서의 수압과 암석재료의 간극수압 및 시간적 경과를 결정하는 암반내의 투수성 및 저수능력은 당연히 현장의 지질구조적인 특성에 의해 좌우된다. 또한 암반내의 지하수 상태, 즉 유량, 수압, 유속 등에 의해 암반의 안정성을 좌우하는 양압력과 균열에서의 간극수압 상태, 충전물질의 강도 감소, 균열면에서의 마찰저항 감소 등이 어느정도 영향을 주는가를 명확히 할 필요가 있다.

점토 등 충전물질을 포함하지 않는 절리에서는 간극수압의 작용에 의한 암석중량이 경감되는 동시에 절리에 있어서 마찰성분과 암반강도의 본질적인 요

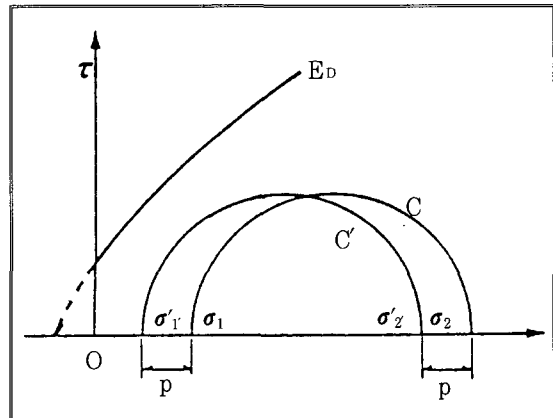


그림 6.3.1. 물의 작용에 의한 암반강도 감소

소가 변화하는 경우가 있다. 지하수에 의한 간극수압은 균열면에 있어서 전단저항에 대한 인장응력으로서의 효과를 주는 것 같이 작용하기 때문에 그림 6.3.1에서 보여주는 바와 같이 응력상태 (σ_1, σ_2) 를 나타내는 Mohr의 응력원 C는 Mohr원 C'의 응력상태 (σ'_1, σ'_2) 까지 이동되어 최초 응력상태에 있어서 암반의 파괴에 대한 포락선 E_D 에 접근하게 되어 파괴에 대한 안정성은 감소하게 된다.

전체적으로 습윤상태에서 암반에 있어서의 양압력은 흙의 경우와 달라 일반적으로 연직방향을 향하는 것 만은 아니다. 그것은 모든 균열면이 물에 완전 포화되는 것은 아니기 때문이다. 따라서 암반 간극수압에 의한 양압력의 방향은 암반의 구조면에 관계된다.

6.3.3. 불연속면내에서의 물의 역학적 영향

암반구조물의 역학 응답에 대하여 물의 영향을 평가하는 것은 중요하다고 할 수 있다. 흙의 입자와 불연속성 암반의 불연속면으로 둘러 쌓인 블록을 동일하게 취급하는 것은 물성 및 형상에 있어서 무리가 있지만 여기에서는 많은 블록이 집합되어 있는 암반의 범위를 흙입자의 집합과 같다고 가정한다. 흙에서의 역학적 효과에 있어서는 식(6.3.1) Terzaghi(1945)가 유효응력 원리를 최초로 도입하였다.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij} \quad (6.3.1)$$

여기에서 σ_{ij} 는 전응력 텐서, p 는 액체압력, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다.

Biot(1941)가 고체의 체적변형계수를 K 라 하고, 고체 골격의 체적변형계수를 K_s , 간극률 n 에 의해 결정되는 변수 α 로 나타낸 식은 다음과 같다.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (6.3.2)$$

여기에서

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (6.3.3)$$

만일 체적변형계수 K 가 물의 체적변형계수 K_f 와 고체 골격의 체적변형계수 K_s 와의 병렬관계 개념으로 고려한다면 아래식과 같이 된다.

$$K = (1-n)K_s + nK_f \quad (6.3.4)$$

결과적으로 아래 식이 얻어진다.

$$\alpha = n \left(1 - \frac{K_f}{K_s}\right) \quad (6.3.5)$$

$K_s \geq K_f$ 일 때 α 는 0과 n 의 사이에 존재한다.

체적변형계수 K 가 골격의 체적변형계수 K_s 와 물의 체적변형계수 K_f 의 관계를 직렬 관계로 생각하면 다음과 같이 된다.

$$K = \frac{K_s K_f}{(1-n)K_f + nK_s} \quad (6.3.6)$$

이 식으로부터

$$\alpha = \frac{n \left(1 - \frac{K_f}{K_s}\right)}{\frac{K_f}{K_s} + n \left(1 - \frac{K_f}{K_s}\right)} \quad (6.3.7)$$

와 같이 나타낼 수 있다. $K_s \geq K_f$ 일 때 α 는 0 혹은 1이 된다. 이 원리는 물의 영향을 고려 했을 때의 암반 불연속면의 역학거동에 대해서도 같은 생각으로 적용할 수 있다. 이 경우 응력텐서는 수직응력 σ_n 으로, K_s 는 고체의 탄성계수 E_s 로, K_f 는 물의 탄성계수 E_f 로 각각 치환하고 또한 간극률 n 은 불연속면의 전영역 A_t 와 접촉영역 A_c 등으로 결정되는 계수 η 에 의해 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\sigma'_n = \sigma_n - \alpha p, \quad \eta = \frac{A_c}{A_t}, \quad \alpha = \eta \left(1 - \frac{E_f}{E_s}\right) \quad (6.3.8)$$

Terzaghi와 Biot의 방법을 고려하면 α 의 값은 큰 차이가 있을 수 있다.

많은 기술자 및 연구자들은 Terzaghi 와 Biot의

방법을 많이 이용하고 있다. 여기에서 지금까지의 원리를 이용하여 수중에서의 불연속면 거동을 모델링한 결과를 설명하면 다음과 같다.

우선 α 의 값은 명확하지 않기 때문에 그림 6.3.2에 표시한 모델에 대하여 Biot 형식의 유효응력 원리를 이용하여 평형방정식을 유도한다.

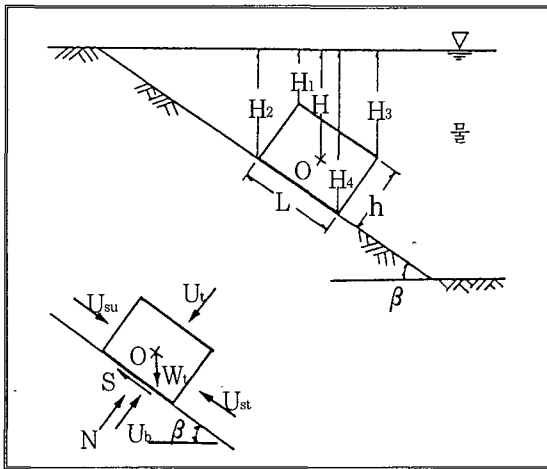


그림 6.3.2. 수중의 불연속면

$$\Sigma F_s = W_t \sin \beta + U_{su} - U_{sl} - S = 0 \quad (6.3.9)$$

$$\Sigma F_n = N + U_b - W_t \cos \beta - U_t = 0 \quad (6.3.10)$$

이 식에서

$$W_t = (1-n)W_{br} + nW_{bw}, \quad (6.3.11)$$

$$W_{br} = \gamma_t hLB, \quad W_{bw} = \gamma_w hLB \quad (6.3.12)$$

$$U_{sl} = \gamma_w \frac{H_3 + H_4}{2} hB, \quad (6.3.13)$$

$$U_{su} = \gamma_w \frac{H_1 + H_2}{2} hB \quad (6.3.14)$$

$$U_t = \gamma_w \frac{H_1 + H_3}{2} LB, \quad (6.3.15)$$

$$U_b = \gamma_w \frac{H_3 + H_4}{2} hB \quad (6.3.16)$$

또 가정한 블록의 활동에 대한 조건은 다음과 같

이 된다.

$$S = \mu N, \quad \mu = \tan \phi \quad (6.3.17)$$

이상의 관계에서 아래식을 얻을 수 있다.

$$\mu = \frac{W_t \sin \beta - U_{sl} U_{su}}{W_t \cos \beta - \alpha U_b U_t} \quad (6.3.18)$$

이 식을 기하학적으로 사용하기 위하여 변형하면 다음과 같이 된다.

$$\mu = \frac{(1-n)(W_{br} - W_{bw}) \sin \beta}{[(1-n)W_{br} - ((\frac{1+3\alpha}{4})-n)W_{bw}] \cos \beta + (\alpha-1)\gamma_w HLB} \quad (6.3.19)$$

만약 이 식에서 Terzaghi로부터 $\alpha=1$ 이라 두면, 다음과 같은 간단한 관계가 된다.

$$\mu = \tan \beta \quad (6.3.20)$$

이 식은 수압의 효과는 서로 영향을 미치는 블록의 활동에 대하여 무관하다. 이 결과 Terzaghi의 유효응력원리가 성립한다면 암반의 불연속면이 수중의 상태로 있을 때에도 건조상태로 있을 때와 동일하게 된다.

6.4. 불연속성 암반사면의 파괴양식

암반사면의 파괴는 암석의 역학특성과 불연속면의 역학특성 및 불연속면의 기하학 특성 등의 요인을 반영하고 있다. 이들의 복합적인 요인에 의해 사면에서는 여러 가지 파괴양식이 나타난다.

본절에서는 실험 및 현장조사 결과로부터 파괴형태를 상세히 검토하고 파괴양식의 요인을 암석의 역학적 특성에 의한 파괴, 암석과 불연속면의 역학특성에 기인하는 파괴 및 불연속면의 역학특성에 기인하는 파괴 등으로 구분하여 설명한다. (그림 6.4.1 참조).

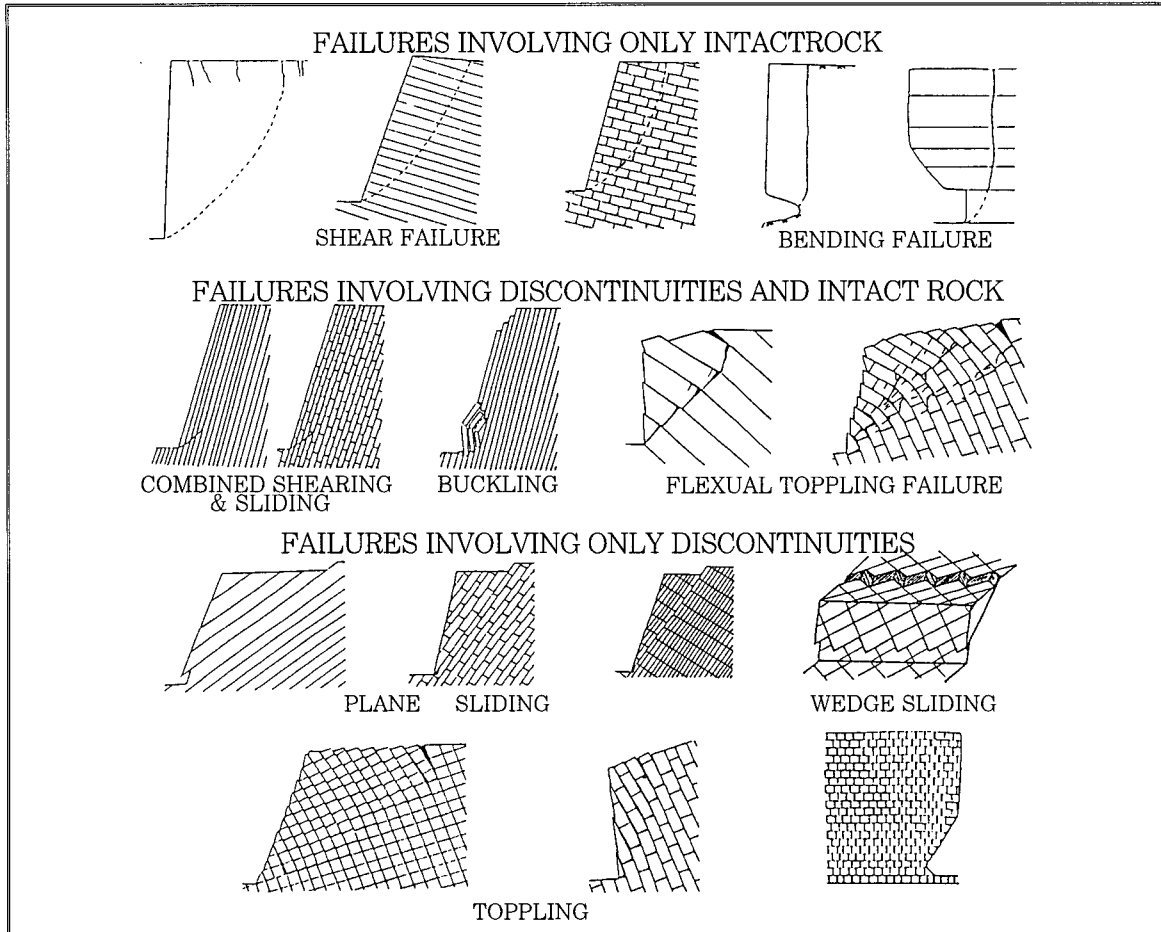


그림 6.4.1. 불연속성 암반사면의 파괴양식

6.4.1. 암석의 역학특성에 의존하는 파괴

1) 전단파괴

이 파괴는 암반중에 암석의 전단응력이 전단강도를 넘어서 활동을 일으키는 파괴를 말한다. 지각변동 및 사면의 불안정화에 의한 암석자체의 전단파괴에 의해 발생한다.

2) 전도파괴

이 파괴는 사면의 밑부분이 침식 등에 의해 깎여 없어졌거나 연약화 되었을 때 발생한다.

6.4.2. 암석의 역학 특성과 불연속면의 역학특성에 의존하는 파괴

1) 전단과 활동의 복합적인 파괴

불연속면의 경사각이 사면의 경사각보다 클 때, 사면 상부에서는 불연속면을 통하여 활동이 발생한다. 활동이 일어난 후 사면 밑부분에서의 전단응력은 강도를 초과하였기 때문에 복합적인 파괴가 일어날 수 있다. 불연속면의 경사가 작을 때에는 사면 경사각에 의해서 전단파괴가 일어나며, 사면 선단에서 활동이 일어나 파괴에 도달하는 경우도 있다.

2) 버클링 파괴

이 파괴는 불연속면의 경사가 사면의 경사와 거의 같고, 불연속면의 간격이 사면의 높이에 비해 매우 작은 상태에서 발생한다. 상부로부터 하중이 한 쪽으로 작용하여 암석의 압축강도를 초과했을 때 또는 수평방향으로 수압과 지진력이 작용한 경우 등에서 보여진다.

3) 굴곡성 전도파괴

전도파괴는 사면을 구성하는 암괴가 사면방향으로 전도되어 파괴되는 것을 말한다. 그 중 굴곡성 전도파괴는 층상암반에서 발생한다. 층상암반은 사면 방향으로 전도됨으로서 암층 외측에 과대한 인장응력이 가해져 파괴에 도달하게 된다.

6.4.3. 불연속면의 역학특성에 의존하는 파괴

1) 활동성 파괴

이 파괴는 불연속면의 경사가 사면 경사각보다 작고, 암반의 표면 마찰각보다 클 때 불연속면을 통하여 활동이 발생하여 파괴하게 된다. 활동면의 형상에 의해 평면파괴와 썩기형파괴로 구분된다.

평면파괴는 한 개의 불연속면상에서 활동이 일어나는 것을 말하고, 사면의 방향과 불연속면의 주향이 같거나 비슷할 때 일어나기 쉽다. 썩기형파괴는 두 개 이상의 불연속면에서 활동이 발생하여 파괴에 도달하는 것으로써 활동면은 썩기형을 만들게 된다.

2) 블록성 전도파괴

암반중에 블록상의 불연속면이 발달하고 있을 때 발생하기 쉽다. 암괴가 활동하지 않고 사면방향으로 전도되어 파괴되는 것이다.

3) 전도와 전단의 복합성 파괴

전도파괴와 전단파괴의 양쪽이 복합적으로 발생하여 파괴하는 것으로서 암반중의 불연속면이 층상, 블록상 모두가 보인다.

6.5. 안정성 해석

불연속면을 포함하는 암반사면의 역학적 특성은 암석의 역학적 특성, 불연속면의 역학적 특성 및 암반의 기하학적 특성을 들 수 있다. 불연속성 암반사면의 붕괴는 이 세가지의 요인중에 특히 불연속면의 역학적 특성과 기하학적 특성에 의존하는 경우가 많고, 이들 요인을 기초로한 내외적인 불안정화로 유도되는 작용이 더해짐으로서 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 암반사면에서는 여러 가지 파괴양식이 보여진다.

6.5.1 전단파괴에 대한 안정해석

전단응력이 암반의 전단강도를 초과한 경우에 일어나는 파괴이다. 해석은 파괴면의 형상이 평면과 원호 등 2종류의 파괴선을 가정하기로 한다.

1) 평면전단파괴에 대한 안정해석

그림 6.5.1과 같이 파괴시 파괴면의 경사각을 α 로 하면, 그 면에 있어서 수평·수직방향의 힘의 평형방정식은 다음과 같이 된다.

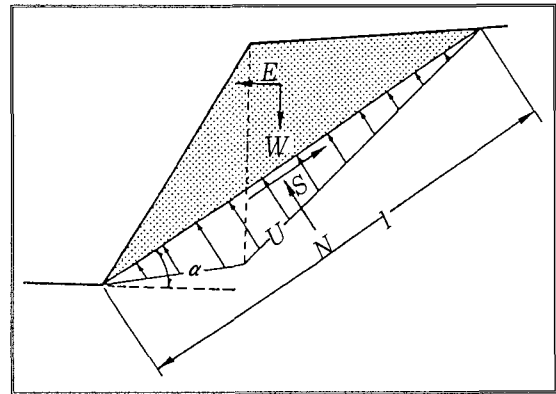


그림 6.5.1. 평면 활동파괴

$$\Sigma F_H = E + (N + U) \sin \alpha - S \cos \alpha = 0 \quad (6.5.1)$$

$$\Sigma F_V = W - (N + U) \cos \alpha - S \sin \alpha = 0 \quad (6.5.2)$$

또한 Mohr-Coulomb의 기준으로부터 다음 식과

같이 된다.

$$T = C' l + N \tan \phi' \quad (6.5.3)$$

여기에서

W : 활동블록의 중량 E : 지진력
 N : 파괴면의 수직력 S : 파괴면의 전단력
 U : 양압력 C' : 암반의 점착력
 φ' : 암반의 내부마찰각 T : 전단저항력
 l : 파괴면의 길이

등으로 된다. 이들 3개의 식에 의해 미지의 변수 N, S, T를 구하면 안전율 SF는 다음과 같이 구해진다.

$$SF = T/S \quad (6.5.4)$$

최소 안전율은 예상되는 활동선의 각도 α를 순차적으로 변화시켜 구한다.

2) 원호 전단파괴에 대한 안정 해석

간단하게 하기 위하여 사면전단 파괴로 가정하여 그림 6.5.2와 같이 원호의 중심위치와 반경을 토질공학에서 이용된 간편법에 의해 안전율, SF를 최소로 하는 각도 α를 구한다. 해석법은 토질공학에서 잘 이용되는 Bishop(1955), Spencer 등의 분할법이 있다.

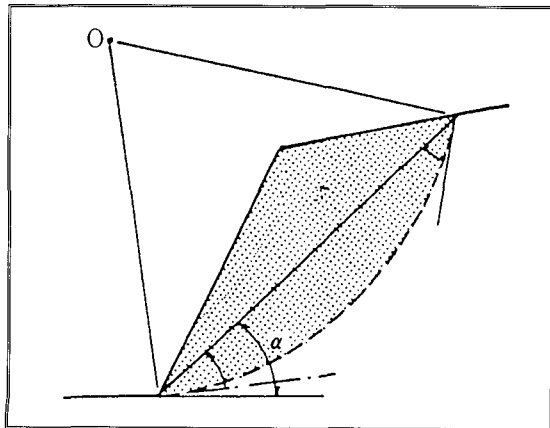


그림 6.5.2. 토질역학에서 이용되는 간편법

6.5.2. 활동파괴에 대한 안정 해석

이 파괴는 불연속면을 따라 활동을 일으키는 파괴이다. 활동면의 형상에 따라 평면파괴와 썰기형파괴 등으로 구분된다.

1) 평면파괴에 대한 안정 해석

평면파괴는 사면과 불연속면의 방향(주향)이 평행에 가까운 경우에 발생하는 하나의 불연속면상에서의 활동이다. 파괴는 불연속면을 따라 일어나기 때문에 암반의 전단강도를 불연속면의 전단강도로 치환하여 평면전단파괴와 같은 해석 방법을 사용한다.

2) 썰기형 파괴에 대한 안정 해석

이 해석에 있어서는 3차원적인 형상이 문제로 된다. 그림 6.5.3과 같이 2개의 불연속면에 의한 썰기형 활동이 일어난다고 하면, 그림중의 Otsn 좌표계에 있어서 각 방향의 힘의 평형방정식은 다음과 같다.

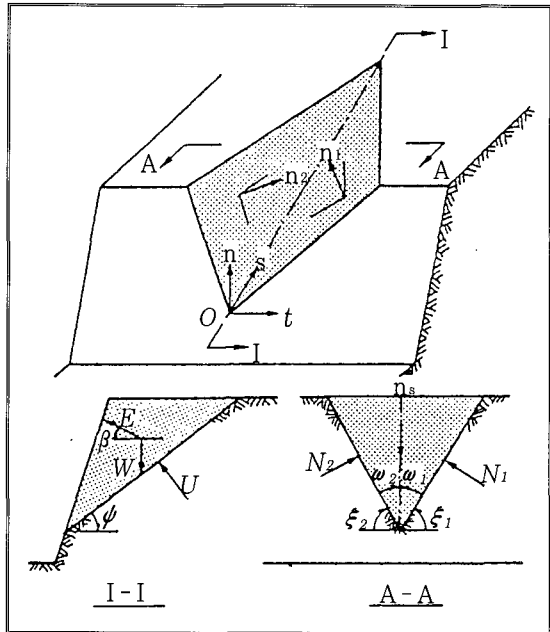


그림 6.5.3. 썰기형 파괴

$$\Sigma F_s = W \sin \phi + E \cos \phi - S = 0 \quad (6.5.5)$$

$$\Sigma F_s = W \cos \phi + E \sin \phi - N_1 \sin \omega_1 - N_2 \sin \omega_2$$

$$-U_1 \cos \omega_1 - U_2 \sin \omega_2 = 0 \quad (6.5.6)$$

$$\begin{aligned} \Sigma F_t = & -N_1 \cos \omega_1 + N_2 \sin \omega_2 - U_1 \cos \omega_1 \\ & + U_2 \sin \omega_2 = 0 \end{aligned} \quad (6.5.7)$$

또한 파괴기준은 다음식과 같이 표현된다.

$$T = A_1 \cdot Cd_1 + A_2 \cdot Cd_2 + (N_1 + N_2) \tan \phi_d \quad (6.5.8)$$

이들 식에서의 각 기호는 다음과 같다.

- W : 활동블록의 중량
- U_1, U_2 : 양압력
- S : 파괴면의 전단력
- N_1, N_2 : 불연속면에서의 수직력
- E : 지진력
- U_{d1}, U_{d2} : 불연속면에서의 점착력
- ϕ_d : 불연속면의 마찰각
- A_1, A_2 : 불연속면의 각 면적
- T : 전단저항력
- ϕ : 썩기의 교선 각도

상기 식에서 S, N_1, N_2, T 등을 구하여 안전율 SF 를 다음과 같이 구한다.

$$SF = T/S \quad (6.5.9)$$

그림 6.5.3의 A-A 단면에서 각도 ξ_i 가 $\xi_i > 90^\circ$ 일 때에는, 그 면의 활동에 대한 저항은 없는 것으로 되기 때문에 단지 한방향의 평면활동으로 하여 해석한다.

6.5.3. 전단과 활동의 복합파괴에 대한 안정 해석
암반의 전단과 불연속면에 따른 활동이 복합적으로 일어나는 파괴이다. 파괴면은 암반중에 형성된 전단면과 불연속면으로 되어 있기 때문에 전단에 의한 해석과 불연속면에서의 활동에 의한 해석을 동시에 실시한다. 그림 6.5.4와 같이 전단면과 불연속면에

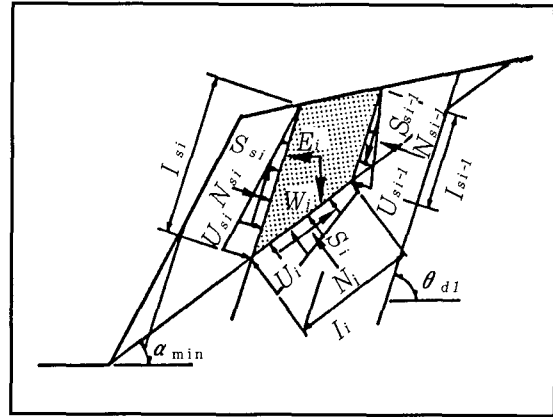


그림 6.5.4. 전단면과 불연속면에 의해 형성된 블록

의해 만들어진 분할 블록을 결정하여 블록 측면은 미끄러지는 것으로 하고, 블록 밑부분에서 전단파괴를 일으키는 것으로 한다. 또한 수평으로부터의 각도를 α_{min} 로 하고, 블록의 폭은 불연속면의 간격으로 한다. 각각의 변수는 다음과 같다.

- N_i : 파괴면의 수직력
- N_{si} : 활동면의 수직력
- W_i : 블록의 중력
- U_i, U_{si} : 양압력
- C_d : 불연속면의 점착력
- ϕ : 암석의 내부마찰각
- ϕ_d : 불연속면의 마찰각
- θ_d : 불연속면의 경사각
- S_i : 파괴면의 전단력
- S_{si} : 활동면의 전단력
- E_i : 지진력
- C : 암석의 점착력

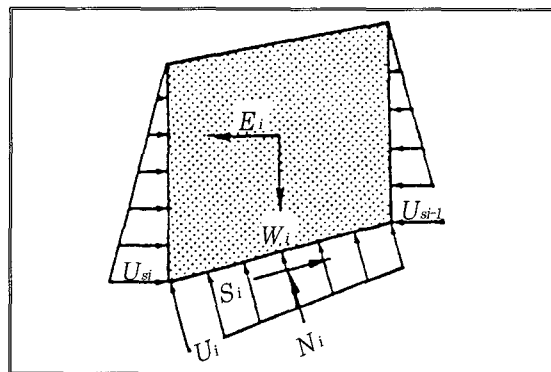


그림 6.5.5. 블록에 작용하는 기호와 힘 관계

상부에서 i 번째의 블록에 주목한다. 간단히 하기 위해 W_i, U_i, E_i, S_i, N_i 의 힘의 평형방정식을 그림 6.5.5와 같이 생각한다.

$$\Sigma F_{Hi} = S_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i - E_i + U_{S_{i-1}} \sin \theta_d - U_{S_i} \sin \theta_d = 0 \quad (6.5.10)$$

$$\Sigma F_{Vi} = S_i \sin \alpha_i + N_i \cos \alpha_i - U_{S_i} \cos \theta_d + U_{S_{i-1}} \cos \theta_d + U_i = 0 \quad (6.5.11)$$

$$S_i = C \cdot l_i + N_i \tan \phi \quad (6.5.12)$$

ΣF_{Hi} 가 음으로 되었을 경우는 블록이 자중만으로 활동하게 된다. 따라서 상부로부터 계산해서 $\Sigma F_{Hi} < 0$ 로 되는 최초의 블록을 활동면으로 하면 된다. 이와 같이 해서 사면의 형상을 그림 6.5.6과 같이 결정한다.

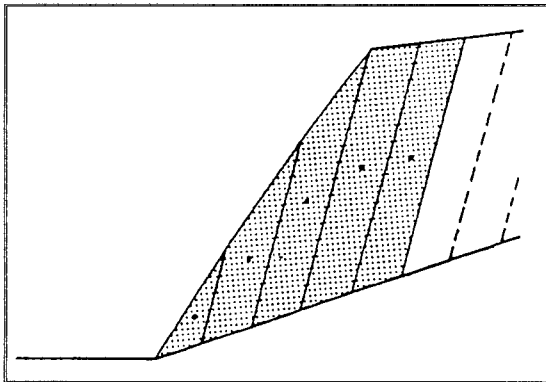


그림 6.5.6. 파괴 영역

다음으로 상부 블록으로부터 경계조건 $N_{S_0} = 0, S_{S_0} = 0$ 로 하여 i 번째의 블록에 대하여 수평·수직의 힘의 평형방정식은 다음식과 같이 된다.

$$\Sigma F_{Hi} = E_i + (N_i + U_i) \sin \alpha_{\min} + (N_{S_{i-1}} + U_{S_{i-1}} - N_{S_i} - U_{S_i}) \sin \theta_d - S_i \cos \alpha_{\min} + (S_{S_{i-1}} - S_{S_i}) \cos \theta_d = 0 \quad (6.5.13)$$

$$\Sigma F_{Vi} = W_i + (N_i + U_i) \cos \alpha_{\min} + (N_{S_{i-1}} + U_{S_{i-1}} - N_{S_i} - U_{S_i}) \cos \theta_d - S_i \sin \alpha_{\min} + (S_{S_{i-1}} - S_{S_i}) \sin \theta_d = 0 \quad (6.5.14)$$

또한 안전율 SF 와 암석의 전단에 대한 파괴기준으로부터 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i/SF = C \cdot l_i + N_i + N_i \tan \phi \quad (6.5.15)$$

불연속면의 조건으로서는 다음식과 같이 주어진다.

$$S_{S_i} = C_d \cdot l_{S_i} + N_{S_i} \tan \phi_d \quad (6.5.16)$$

이들 식으로부터 N_{S_i} 와 SF 와의 관계식을 구한다. 마지막 블록 n 번째에서의 경계조건을 $N_{S_{end}}$ 로 하면 다음과 같이 주어진다.

$$N_L = N_{S_n} - N_{S_{end}} \quad (6.5.17)$$

사면전체의 안정성은 다음과 같이 마지막 블록의 N_L 값으로 판단하면 된다.

- $N_L > 0$: 불안정
- $N_L = 0$: 안정한계
- $N_L < 0$: 안정

6.5.4. 굴곡성 전도파괴에 대한 안정해석

사면을 구성하는 블록이 사면경사 방향으로 전도

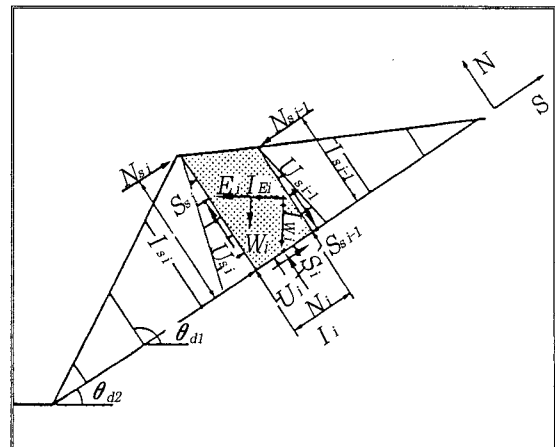


그림 6.5.7. 굴곡성 전도파괴의 기호와 힘 관계

되면서 파괴되는 양식을 말한다. 실내시험 및 현장에서의 관찰에 의하면 사면경사 밑부분을 통하여 블록의 경사방향에 수직한 면 부근에서 발생한다. 따라서 이 면이 암반의 고정된 면이 되어 상부의 자중 및 외력에 의해 부분적으로 굴곡되면서 인장응력이 발생하여 파괴에 도달한다고 생각하면 된다. 그림 6.5.7과 같이 자중이 가해지면 고정된 면 부근에서 발생하는 인장응력 σ_x 는 축응력을 고려하여 구하고, 이 값이 암석의 인장강도 σ_t 를 초과하면 파괴하게 된다. 이 때 안전율은 다음과 같이 표현된다.

$$SF = \sigma_t / \sigma_x \quad (6.5.18)$$

해석에 있어서 블록을 분할하는 방법은 그림 6.5.8과 같이 블록의 밑면을 고정면으로 하여 블록의 폭은 불연속면의 간격, 측면에서는 불연속면의 방향이 수평면과 이루는 각도를 취한다. 식에 대한 각 변수는 다음과 같다.

- N_i : 파괴면의 수직력
- S_i : 파괴면의 전단력
- N_{S_i} : 불연속면의 수직력
- S_{S_i} : 불연속면의 전단력
- M_i : O_i 에 작용하는 모멘트
- W_i : 블록의 중력
- E_i : 지진력
- A : 파괴면의 단면적
- U_i : 양압력
- t : 불연속면의 간격
- C_d : 불연속면의 점착력
- I : 단면2차원 모멘트
- σ_x : 인장응력 σ_t : 인장강도

i 번째의 블록에서 S, N 방향의 힘의 평형방정식과 점 O_i 에 있어서의 모멘트의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\sum F_S = S_i - W_i \sin(\theta_d - 90^\circ) - E_i \cos(\theta_d - 90^\circ)$$

$$+ N_{S_i} - N_{S_{i+1}} + U_{S_i} - U_{S_{i+1}} = 0 \quad (6.5.19)$$

$$\begin{aligned} \sum FN_i &= N_i - W_i \cos(\theta_d - 90^\circ) + E_i \sin(\theta_d - 90^\circ) \\ &+ S_{S_i} - S_{S_{i+1}} + U_i = 0 \end{aligned} \quad (6.5.20)$$

$$\begin{aligned} \sum MO_i &= M_i - I_{S_i} \cdot N_{S_i} + I_{S_{i+1}} \cdot N_{S_{i+1}} - \frac{1}{2}t \cdot S_{S_i} - \\ &\frac{1}{2}t \cdot S_{S_{i+1}} + I_{E_i} \cdot E_i l_{W_i} \cdot W_i - \frac{1}{3}I_{S_i} U_{S_i} \\ &+ \frac{1}{3}I_{S_{i+1}} U_{S_{i+1}} = 0 \end{aligned} \quad (6.5.21)$$

따라서 불연속면에 있어서는 다음과 같이 된다.

$$S_{S_i} = C_d \cdot I_{S_i} + N_{S_i} \tan \phi_d \quad (6.5.22)$$

또한 축응력을 고려하면 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{xi} = \frac{N_i}{A_i} + \frac{M_i t}{I_i 2} \quad (6.5.23)$$

이들 식으로부터 미지수 $S_i, N_i, N_{S_i}, S_{S_i}, \sigma_{xi}$ 를 구하면 된다. 파괴하는 i 번째 블록에 대한 경계조건을 $N_{S_{i+1}} = 0, S_{S_{i+1}} = 0$ 로 하여 상부 블록으로부터 순차적으로 N_{S_i} 의 해를 구해준다. 안정성의 평가는 n 번째의 블록 N_{S_n} 로 판단한다.

6.5.5. 블록성 전도파괴에 대한 안정 해석

층상 혹은 블록상 암반에서는 블록상으로 전도파괴를 일으키는 경우가 많다. 그림 6.5.8과 같이 분할한 블록을 결정한다. 해석은 최상부 블록에 경계조건 $N_{S_{i-1}} = 0$ 를 넣어 순차적으로 구한다. 기호는 다음과 같이 두고 변수는 앞의 경우와 같다.

- N_i : 파괴면의 수직력
- S_i : 파괴면의 전단력
- N_{S_i} : 불연속면의 수직력
- S_{S_i} : 불연속면의 전단력
- M_i : O_i 에 작용하는 모멘트

W_i : 블록의 중력
 E_i : 지진력
 I_i, l_{Si} : 불연속면의 길이
 U_i, U_{Si} : 양압력
 t_i : 불연속면의 간격
 C_d : 불연속면의 점착력
 θ_{d2} : 불연속면의 각도

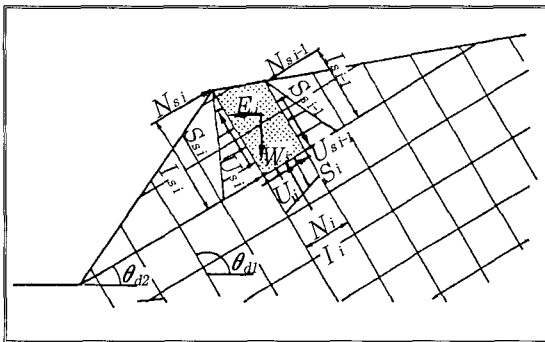


그림 6.5.8. 전도파괴의 기호와 힘 관계

i 번째 블록에 그림 6.5.8과 같이 외력이 주어지면 전도를 일으키는 O_i 점의 모멘트 M₊는 다음과 같다.

$$M_+ = l_{S(i-1)} \cdot N_{S(i-1)} + l_{E_i} \cdot E_i + l_{W_i} \cdot W_i + \frac{1}{3} l_{S_i} \cdot U_{S(i-1)} + l_i \cdot U_i \quad (6.5.24)$$

그리고 저항 모멘트 M₋는 다음과 같다.

$$M_- = l_{S_i} \cdot N_{S_i} + t_i \cdot S_{S(i-1)} + \frac{1}{3} l_{S_i} \cdot U_{S_i} \quad (6.5.25)$$

따라서 안전율은 다음과 같이 된다.

$$SF = M_- / M_+ \quad (6.5.26)$$

수평 · 수직방향에서의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\Sigma F_{S_i} = S_i + U_{S_i} - U_{S(i-1)} + N_{S_i} - N_{S(i-1)}$$

$$-W_i \sin \theta_{d2} - E_i \cos \theta_{d2} = 0 \quad (6.5.27)$$

$$\Sigma F_{N_i} = N_i + S_{S_i} - S_{S(i-1)} - U_i - W_i \cos \theta_{d2} - E_i \cos \theta_{d2} = 0 \quad (6.5.28)$$

또한 Mohr-Coulomb의 파괴기준으로부터

$$S_{S_i} = C_d \cdot l_{S_i} + N_{S_i} \tan \phi_{d_i} \quad (6.5.29)$$

로 두면, 위의 식에서 N_i, S_i, N_{S_i}, S_{S_i}가 구해진다. 파괴하는 i 번째의 블록에 대한 경계조건을 N_{S_{i-1}} = 0, S_{S_{i-1}} = 0로 여 순차적으로 블록의 N_{S_i}를 구한다. 안정성의 평가는 마지막 n 번째의 블록을 N_{S_{end}}로 하면, 다음과 같은 식이 주어진다.

$$N_L = N_{S_n} - N_{S_{end}} \quad (6.5.30)$$

이 N_L 과 SF의 관계는 다음과 같다.

- N_L > 0 : 불안정
- N_L = 0 : 안정한계
- N_L < 0 : 안정

6.6. 암반사면에의 적용 사례

대상은 도로건설로 인한 암반 절개사면이다. 현장의 지질은 셰일과 사암이 호층을 이루고 있다. 사암보다 셰일의 강도가 작기 때문에 전단활동에 대해서는 셰일의 강도에 의존한다고 볼 수 있다.

6.1. 전단파괴

전단파괴에 대한 안정해석은 6.5.1절의 평형방정식을 이용하였다. 이 식에서는 점착력 C와 마찰각 φ가 필요하지만 원위치에서 전단시험을 수행하지 않았기 때문에 불연속면을 포함한 블록시료를 채취하여 실내 직접전단시험으로 C와 φ를 추정하였다. 마찰각은 20°로 설정하고 C/γ를 변수로 하여 사면높이와 사면각도를 plot하면 C/γ는 8~11m로 된다.

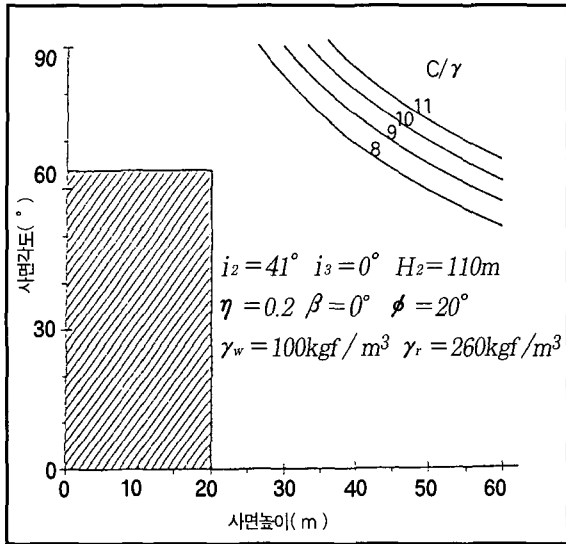


그림 6.6.1. C/γ를 기초로 한 설계사면의 안정성

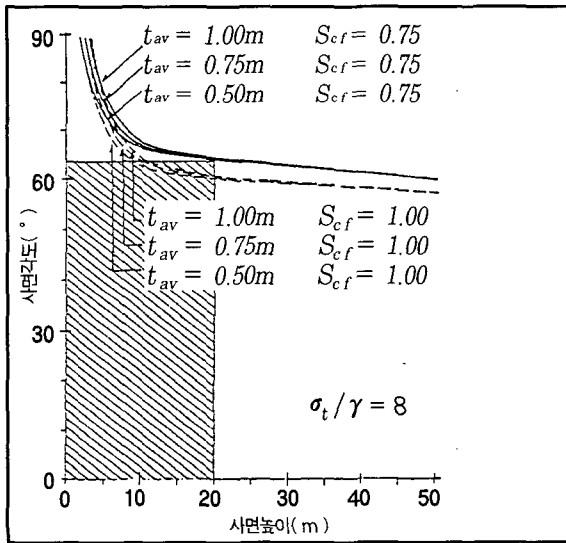


그림 6.6.2. 현장 데이터에 의한 설계사면의 안정성

또한 $C/\gamma = 8 \sim 11m$ 로 하여 그림 6.6.1의 조건으로 절취사면의 안정성을 계산하면 그림 6.6.1과 같은 곡선군이 구해진다. 사면의 계획 높이와 각도는 그림 내 사선부분으로 표시하였다. 따라서 이 사면은 전단 파괴에 대해서 안정한 것으로 예측된다.

6.6.2. 굴곡성 전도파괴

굴곡성 전도파괴의 해석은 6.5.4절의 식을 이용하였다. 이 때 암반의 인장강도가 필요하지만 암반에서의 인장강도를 구하기는 매우 어렵다. 다만 일반적으로 C/γ 와 σ_t/γ 와는 매우 근접한 값을 가지는 것으로 생각되기 때문에 앞의 C/γ 값을 이용하여 σ_t/γ 를 8로 하였다. 전단파괴와 동일 조건으로 총후(t_{av})를 0.5~1.0m, 인접 블록의 하중의 재하위치계수 S_{cf} (최상부가 1.00)를 0.75와 1.00 두 경우로 나누어 안정해석을 하였다. 그 결과 그림 6.6.2를 구하였다. 이 그림으로부터 S_{cf} 의 값이 0.75일 때는 현재의 절취사면은 안정으로 예측되지만, S_{cf} 가 1.00으로 되면 불안정한 결과로 예측된다.

참고문헌

1. Aydan, O., (1989), The stabilization of rock engineering structures by rock bolts, Ph.D. Thesis of Nagoya University, p.204.
2. Barton, N. ., (1974), Engineering classification of rock mass for the design of tunnel support, Rock Mechanics, 6, 189-236.
3. Barton, N. and V. Choubey, (1977), The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, 10, 1-54.
4. Barton, N., (1981), Some effects of scale on the shear strength of joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 17, 69-73.
5. Bieniawski, Z. T., (1973), Engineering classification of jointed rock mass, Trans. S. A. fr. Inst. Civil Engineering, 15, 335-344.

6. Biot, M. A., (1941), General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl.*, 12, 155-164.

7. Bishop, A. W., (1955), The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, 1, 7-17.

8. Cundall, P. A., (1971), A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems, *Proc. Symp.*, ISRM, 129-136.

9. Hoek. E. and E. T. Bray, (1977), *Rock*

slope engineering, Inst. Min. & Met., London.

10. Hoek, E., (1983), Strength of jointed rock mass, *Geotechnique*.

11. ISRM, (1978), Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mass, 1-50.

12. Terzaghi, K. V., (1945), Stress conditions for the failure of saturated concrete and rock, *Proc. Am. Soc. Test. Mater.*, 45, 777-801.